

1	Umfang und Bedeutung der Elektrischen Meßtechnik	1
1.1	Zur Historie und Bedeutung der Meßtechnik	1
1.2	Der Begriff des Messens	3
1.3	Begriffsdefinitionen in der Meßtechnik	4
1.3.1	Allgemeine Begriffe	4
1.3.2	Meßgerät und Meßeinrichtung	5
1.3.3	Meßkette (Struktur einer elektrischen Meßeinrichtung)	5
1.4	Vorschriften und Normen	6
1.5	Klassifizierung von Meßmethoden	6
1.5.1	Ausschlagmethode - Kompensationsmethode	6
1.5.2	Analog - Digital	7
1.5.3	Kontinuierlich - Diskontinuierlich	9
1.5.4	Direkt - Indirekt	9
1.6	Die Informationsträger im Meßsignal	9
2	Die Grundlagen des Messens	11
2.1	Maßsysteme, Einheiten, Naturkonstanten	11
2.1.1	Maßsysteme	11
2.1.2	Naturkonstanten	12
2.1.3	Abgeleitete Einheiten	13
2.2	Größen- und Zahlenwertgleichungen	13
3	Ausgleichsvorgänge, Frequenz-Transformation und Vierpol-Übertragungsverhalten	17
3.1	Fourier-Transformation	17
3.2	Ausgleichsvorgänge in linearen Netzwerken	21
3.3	Die Laplace-Transformation	24
3.4	Die Laplace-Transformierte elementarer Zeitfunktionen	27
3.5	Die Eigenschaften der Laplace-Transformation – Laplace-Transformation einfacher mathematischer Operationen	30

3.5.1	Überlagerung	30
3.5.2	Integration	30
3.5.3	Differentiation	31
3.5.4	Produkt zweier Laplace-Funktionen - Faltung	31
3.5.5	Multiplikationssatz	33
3.5.6	Verschiebung im Zeitbereich (Oberbereich)	33
3.5.7	Verschiebung im Laplace-Bereich (Unterbereich)	34
3.5.8	Dehnung bzw. Stauchung	34
3.5.9	Anfangswert-Theorem	34
3.5.10	Endwert-Theorem	35
3.6	Analyse eines RC-Netzwerkes mittels Laplace-Transformation ..	35
3.7	Die Rücktransformation von Laplace-Transformierten in den Zeitbereich	36
3.8	Lösung von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	37
3.9	Berechnung von Einschwingvorgängen in elektrischen Netzwerken mit konzentrierten linearen passiven Bauelementen	40
3.10	Rücktransformation mittels Residuenmethode - Heavisidescher Entwicklungssatz	51
3.11	Vierpol-Übertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich ..	54
3.12	Beschreibung von linearen zeitinvarianten Netzwerken durch ihre Sprungantwort	58
3.13	Bode-Diagramme	59
3.13.1	Regeln für Bode-Diagramme	61
4	Nichtlineare Bauelemente, Schaltungen und Systeme	71
4.1	Nichtlineare Bauelemente	71
4.1.1	Nichtlinearer Widerstand	71
4.1.2	Nichtlineare Induktivität	74
4.1.3	Messung von Hysteresekurven	79
4.1.4	Nichtlineare Kapazität	80
4.1.5	Gesteuerte Quellen	82
4.2	Analyse nichtlinearer elektrischer Netzwerke	83
5	Meßfehler	89
5.1	Systematische Meßfehler	90
5.2	Zufällige Meßfehler	91
5.2.1	Normalverteilung, Mittelwert, Standardabweichung ...	91
5.2.2	Vertrauensbereich für den Schätzwert	94
5.2.3	Fortpflanzung zufälliger Fehler	98
5.3	Genauigkeitsklassen bei Meßgeräten	99
5.4	Dynamische Meßfehler	100
5.4.1	Das Übertragungsverhalten von Meßsystemen	100
5.4.2	Definition des dynamischen Meßfehlers	105
5.4.3	Bestimmung des dynamischen Meßfehlers	105

5.4.4	Meßsystem mit Tiefpaßverhalten	106
6	Analoges Messen elektrischer Größen	111
6.1	Elektromechanische Meßgeräte	111
6.1.1	Drehspulmeßwerk	112
6.1.2	Galvanometer	117
6.1.3	Elektrodynamisches Meßwerk	120
6.1.4	Dreheisenmeßwerk	123
6.1.5	Drehspulquotientenmeßwerk (Kreuzspulmeßwerk)	124
6.1.6	Drehmagnetmeßwerk	126
6.1.7	Elektrostatisches Meßwerk	127
6.1.8	Schaltzeichen für Meßgeräte	130
6.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	130
6.2.1	Messung von Gleichströmen	130
6.2.2	Messung von Gleichspannungen	133
6.2.3	Gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung	136
6.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	137
6.3.1	Begriffsdefinitionen	137
6.3.2	Gleichrichtung	139
6.3.3	Messung des Scheitelwertes (Spitzenwert, Peak Value)	140
6.3.4	Messung des Gleichrichtwertes	142
6.3.5	Messung des Effektivwertes	143
6.3.6	Meßwandler	145
7	Meßverstärker	153
7.1	Operationsverstärker	154
7.1.1	Idealer Operationsverstärker	154
7.1.2	Realer Operationsverstärker	155
7.1.3	Definitionen von Operationsverstärker-Kenngrößen	158
7.1.4	Operationsverstärker-Grundsaltungen	165
7.2	Spezielle Meßverstärker	178
7.2.1	Differenzverstärker	178
7.2.2	Instrumentenverstärker (Instrumentierungsverstärker)	178
7.2.3	Zerhacker-Verstärker	180
7.2.4	Ladungsverstärker	181
7.3	Rauschen von Meßverstärkern	182
8	Messung der elektrischen Leistung	195
8.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	195
8.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	197
8.2.1	Begriffsdefinitionen	197
8.2.2	Leistungsmessung im Einphasennetz	197
8.2.3	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	199
8.3	Messung der elektrischen Arbeit	207

9	Messung von elektrischen Impedanzen	211
9.1	Messung von ohmschen Widerständen	211
9.1.1	Strom- und Spannungsmessung	211
9.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	212
9.1.3	Verwendung einer Konstantstromquelle	214
9.1.4	Verwendung eines Kreuzspulinstrumentes	215
9.2	Kompensationsschaltungen	216
9.2.1	Gleichspannungskompensation	216
9.2.2	Gleichstromkompensation	217
9.3	Gleichstrom-Meßbrücken	218
9.3.1	Gleichstrom-Ausschlagbrücken	218
9.3.2	Gleichstrom-Abgleichbrücken	221
9.4	Messung von Schein- und Blindwiderständen	221
9.5	Wechselstrom-Meßbrücken	225
9.5.1	Wechselstrom-Abgleichbrücken	225
9.5.2	Einflüsse von Erd- und Streukapazitäten	229
9.5.3	Halbautomatischer Brückenabgleich	230
9.5.4	Wechselstrom-Ausschlagbrücken	233
10	Darstellung des Zeitverlaufes elektrischer Signale	237
10.1	Analoges Elektronenstrahl-Oszilloskop	237
10.1.1	Aufbau und Funktion der Elektronenstrahl-Röhre	237
10.1.2	Zeitablenkung und Triggerung	241
10.1.3	Funktionsgruppen eines Analog-Oszilloskops	244
10.1.4	Sampling-Oszilloskop	247
10.2	Spannungsteiler in Elektronenstrahl-Oszilloskopen	250
10.3	Fehler bei der analogen Elektronenstrahl-Oszilloskopie	251
10.3.1	Statische Fehler (Fehler der Ablenkoeffizienten)	251
10.3.2	Linearitätsfehler	253
10.3.3	Dynamische Fehler des Oszilloskops	254
10.4	Digital-Speicheroszilloskop	261
10.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	261
10.4.2	Wiedergabe des aufgezeichneten Bildes	263
10.4.3	Betriebsarten des Digital-Speicheroszilloskops	265
10.4.4	Einsatz von Digital-Oszilloskopen in Verbindung mit Computern	266
10.5	Vergleich Analog- und Digital-Oszilloskope	266
10.6	Digital-Phosphor-Oszilloskop	266
10.7	Stand der Technik bei Digital-Oszilloskopen	268
11	Digitale Meßtechnik	271
11.1	Duales Zahlensystem und Binärcores	271
11.1.1	Dualzahlendarstellung	271
11.1.2	BCD-, Hexadezimal- und Gray-Code	272
11.1.3	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	272

11.2	Binäre Signale und ihre Verknüpfung	273
11.2.1	Grundregeln bei der logischen Verknüpfung	273
11.2.2	Digitale Grundsaltungen (Gattersaltungen)	274
11.2.3	Digitale Addierer	278
11.3	Bistabile Kippschaltungen	279
11.3.1	RS-Flip-Flop	280
11.3.2	Taktzustandgesteuertes RS-Flip-Flop	281
11.3.3	Taktflankengesteuertes RS-Flip-Flop	281
11.3.4	Taktzustandgesteuertes D-Flip-Flop (Data-Latch)	282
11.3.5	Taktflankengesteuertes D-Flip-Flop	283
11.3.6	Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop	285
11.3.7	Taktflankengesteuertes T-Flip-Flop	286
11.4	Monostabile Kippstufe	287
11.5	Zähler-Schaltungen	289
11.5.1	Dualzähler	289
11.5.2	BCD-Zähler	291
11.6	Digital-Analog-Umsetzung	293
11.6.1	Grundlagen und Kenngrößen	293
11.6.2	Schaltungstechnische Realisierungen	295
11.6.3	Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung	300
11.7	Analog-Digital-Umsetzung	302
11.7.1	Abtastung (Sampling)	303
11.7.2	Abtast-Halte-Schaltungen	306
11.7.3	Direktvergleichende Analog-Digital-Umsetzer	308
11.7.4	Analog-Digital-Umsetzung mit Delta-Sigma-Modulator	314
11.7.5	Time-Division-Multiplizierer (Impulsbreiten-Multiplizierer, Sägezahn-Multiplizierer)	323
11.7.6	Analog-Digital-Umsetzung mit Zeit oder Frequenz	325
11.7.7	Vergleich der Grundprinzipien	332
11.7.8	Fehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	333
11.8	Digital-Multimeter (DMM)	338
11.8.1	Anzahl der Stellen und Genauigkeit	338
11.8.2	Beispiel eines $4\frac{1}{2}$ -stelligen Digital-Multimeters	339
11.8.3	Messungen des echten Effektivwertes von Signalen mit Gleichanteil	340
11.8.4	Totaler Fehler infolge Scheitelfaktor	341
11.9	Strom-/Spannungsquellen mit Rückmeßfunktion (Source Measure Units)	342
11.9.1	Source Measure Units in automatischen Testsystemen	342
11.9.2	Messung kleiner Ströme bzw. Spannungen mit SMUs	344

12 Die Messung von Frequenz und Zeit	347
12.1 Mechanische Frequenzmessung	348
12.2 Digitale Frequenzmessung	349
12.3 Digitale Zeitmessung	350
12.3.1 Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	350
12.3.2 Periodendauermessung	354
12.4 Digitale Phasenwinkelmessung	355
12.5 Rechnender Zähler	355
12.6 Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	356
12.7 Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	357
12.8 Oszillatoren	359
12.8.1 Grundlagen	359
12.8.2 Harmonische Oszillatoren	360
12.8.3 LC-Oszillator	361
12.8.4 Relaxationsoszillatoren	363
12.8.5 Quarzoszillator	365
12.8.6 Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators	370
12.8.7 Fehler von Schwingquarzen	370
12.9 Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung	372
12.10 Zeitzeichensender und Funknavigation	376
12.10.1 DCF-77 Zeitzeichensender	376
12.10.2 NAVSTAR/GPS-Satellitennavigation	377
12.10.3 Galileo-Satellitennavigation	380
13 Meßsignalverarbeitung	383
13.1 Aufgaben und Bedeutung	383
13.2 Signalarten und Analyseformen	385
13.3 Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	386
13.4 Ermittlung des Effektivwertes	389
13.5 Bestimmung von Mittelungswerten	391
13.6 Kenngrößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	393
13.7 Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion	396
13.8 Äußere Störeinflüsse	403
14 Grundlagen der Rechnergestützten Meßdatenerfassung	407
14.1 Grundstrukturen von rechnergestützten Meßsystemen	407
14.2 Basis-Hardware zur Meßdatenerfassung	414
14.2.1 Multifunktions-Einsteckkarten	416
14.2.2 Multiplexer	419
14.2.3 Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	419
14.2.4 Serielle Schnittstellen	422
14.2.5 Parallelbussysteme	423
14.2.6 Datenlogger	423
14.3 Grundtypen des Datentransfers	423

15	Meßdatenerfassung im Labor	425
15.1	Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle)	427
15.1.1	Übertragungsmedien	427
15.1.2	Leistungsbelegung und Steckerverbindung der RS232C-Schnittstelle	428
15.1.3	Pegelfestlegung und deren logische Zuordnung	431
15.1.4	Logikdefinition für Datenleitungen	431
15.1.5	Logikdefinition für Steuer- und Meldeleitungen	431
15.1.6	Synchronisierung	432
15.1.7	Handshake-Verfahren (Quittierungsverfahren)	433
15.1.8	Software-Handshaking	433
15.1.9	Hardware-Handshaking	435
15.1.10	Hardware-Realisierung von seriellen Schnittstellen	435
15.2	Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	438
15.3	Die RS485-Schnittstelle	439
15.3.1	1 Twisted-Pair-Leitung	440
15.3.2	2 Twisted-Pair-Leitungen	440
15.4	Die 20 mA-Stromschleife	441
15.5	Die USB-Schnittstelle	441
15.6	Der IEC-Bus	443
15.6.1	Historie des IEC-Bus	443
15.6.2	Bezeichnungen des IEC-Bus	443
15.6.3	IEC-Bus-Komponenten	444
15.6.4	Gerätegrundfunktionen	444
15.6.5	IEC-Bus-Leitungen	445
15.6.6	Bus-Logik	447
15.6.7	Handshake-Verfahren (Dreidraht-Handshake)	448
15.6.8	Nachrichtenarten	451
15.6.9	Schlußzeichen	455
15.6.10	Statusabfrage	456
15.6.11	IEC-Bus-Hardware	457
15.7	VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	458
15.7.1	VXI-Bus	460
15.7.2	Resource Manager (System Manager)	461
15.7.3	Commander	461
15.7.4	Servant	461
15.7.5	Busgliederung/Teilbusse	462
15.7.6	VXI- und IEC-Bus	462
15.7.7	PXI-Bus	462
15.7.8	PCI-Express	464
15.7.9	MXI-Bus	465
15.7.10	Historie der bisher diskutierten Bus-Standards	466

16	Meßdatenerfassung im Feld	467
16.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	467
16.1.1	Aufbau einer SPS	467
16.1.2	Programmstruktur	467
16.1.3	Permanent-zyklischer Betrieb	468
16.1.4	Ausnahmen vom permanent-zyklischen Betrieb	469
16.1.5	Besonderheiten der Programmierung	469
16.1.6	Programmiersprachen für SPS nach IEC 61131-3	470
16.1.7	Beispiele für die IEC-genormten SPS- Programmiersprachen	472
16.2	Neue Entwicklungen bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS)	478
16.2.1	Vernetzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	478
16.2.2	Visualisierung von SPS-Daten und -Prozessen	482
16.3	Hierarchie industrieller Bussysteme	486
16.4	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	487
16.5	Netzwerktopologien	489
16.6	Bus-Zugriffsverfahren	490
16.6.1	Klassifizierung der Bus-Zugriffsverfahren	491
16.7	Modulationsverfahren und Bitcodierung	492
16.7.1	Alternierende Puls Modulation (APM)	492
16.7.2	Fehlererkennung und Datensicherung	492
16.7.3	Bitcodierung	494
16.8	Schnittstellenkonverter	495
16.9	Der Feldbus (FAN)	496
16.9.1	ASI-Bus	498
16.9.2	CAN	500
16.9.3	PROFIBUS-DP	502
16.9.4	FIP-Bus	505
16.9.5	INTERBUS-S	506
16.9.6	BITBUS	508
16.9.7	EIB (European Installation Bus)	510
16.9.8	LON (Local Operating Network)	512
16.9.9	DIN-Meßbus	513
16.10	Primäre Sensorelement-Schnittstelle (PrimSens)	514
17	Vernetzung von Meßdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN)	519
17.1	IP-Adressen	520
17.2	Subnetzmasken	521
17.3	Internet-Protokoll (IP)	522
17.4	Transmission Control Protocol (TCP)	522
17.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet	522
17.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen	523

17.7	Physikalische Ethernet-Übertragung	523
17.8	Ethernet-Telegrammstruktur	524
17.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze	524
17.10	Standortübergreifende Vernetzung	526
17.10.1	Breitband-ISDN	526
17.10.2	Datex-P	527
17.10.3	GSM	527
17.10.4	Powerline-Kommunikation (Power Line Communication, PLC)	528
17.10.5	Satellitenkommunikation	529
17.10.6	Metropolitan Area Network (MAN)	530
17.10.7	Wide Area Network (WAN)	530
17.10.8	Hochgeschwindigkeits-Glasfasernetz FDDI	530
17.11	Rechnernetze zur Meßdatenübertragung	531
17.11.1	Spezielle Bussysteme zur Meßdatenerfassung	531
17.11.2	Vernetzung von Meßdatenerfassungssystemen mittels Ethernet	532
17.12	Virtuelle Instrumentierung auf der Basis von USB-Meßmodulen	536
17.12.1	Funktionsprinzip	536
17.12.2	Beispiele für USB-Meßgeräte	537
17.13	Ethernet-Nutzung zur Meßdatenerfassung	541
17.13.1	LXI - Ein neuer Standard für die Meßtechnik	541
17.13.2	Die technische Basis von LXI	541
17.13.3	Die 3 Geräteklassen A, B und C des LXI-Standards ..	542
17.13.4	Triggermöglichkeiten von LXI-Geräten	543
17.13.5	Triggerung gemäß IEEE-1588	545
17.13.6	Die Situation des LXI-Gerätemarktes	546
17.14	VPN - Virtual Private Network	547
18	Programmierung von Meßdatenerfassungssystemen	551
18.1	Allgemeine Bemerkungen	551
18.2	IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard	552
18.2.1	Syntax der SCPI-Sprache	554
18.2.2	SCPI-Datenformate	557
18.3	Einsatz kommerzieller Software	558
18.4	Kategorien von Softwarelösungen	558
18.4.1	Dialoggeführte Komplettpakete (Fertiglösungen)	558
18.4.2	Modul-Bibliotheken	559
18.4.3	Graphikorientierte Entwicklungssysteme (Programmgeneratoren)	559
18.4.4	Systeme mit speziellen Kommandosprachen	560
18.5	LabVIEW	561
18.6	LabWindows	565
18.7	MATLAB	567

19 Gebäudeautomatisierung (Smart Home)	571
19.1 Struktur des Gesamtsystems	572
19.2 Datenerfassung mit frequenzanaloger Schnittstelle	573
19.3 Datenerfassung mit digitaler Schnittstelle	575
19.4 Datenerfassung mit energieautarker digitaler Funkschnittstelle	576
19.5 Lokale und weltweite Vernetzung	579
19.5.1 LAN - lokales Netzwerk	579
19.5.2 Standortübergreifende Vernetzung	580
19.5.3 Weltweite Vernetzung	581
19.6 Software	581
Literaturverzeichnis	585
Index	591